고정 소수점 DSP를 이용한 후처리기를 가지는 음향 반향제거기의 구현

이영호[†] · 박장식[††] · 박주성[†††] · 손경식[†††]

요 약

본 논문에서는 잡음에 강건한 적응 알고리즘을 이용하여 음향 반향을 제거하고 추정 오차 신호와 마이크 입력 신호간의 상관도를 이용한 후처리기로 잔여 반향을 감쇠시킴으로써 통화의 품질을 향상시키는 음향 반향 제거기를 ADSP-2181을 이용하여 구현하였다. 제안하는 음향 반향 제거기는 기존의 적응 필터를 이용한 음향 반향 제거기에 비해 계산량이 크게 증가하지 않으면서 잔여 반향을 제거하여 통화 품질을 개선하며, 감쇠기를 통과함으로써 원래 신호가 왜곡이 되는 현상을 방지하기 위하여 두 개의 문턱치를 사용하여 후처리 여부를 결정하여 신호의 왜곡을 막아준다. 그리고 16 비트 고정 소수점 DSP를 이용한 실험 결과를 통하여 잡음에 강건한 적응 알고리즘이 동시 통화 상황에서도 우수하게 동작하고, 수렴 속도도 NLMS 알고리즘에 떨어지지 않음을 보았다. 그리고 후처리기를 사용함으로써 ERLE가 평균 20 dB 이상 향상되었다. 그리고 제안하는 후처리기를 사용하는 반향 제거기의 출력이 기존 후처리기를 통과한 출력보다 신호의 왜곡이 줄어 기존의 음향 반향 제거기에 비해서 성능이 향상됨을 보였다.

Implementation of Acoustic Echo Canceller with A Post-processor Using A Fixed-Point DSP

Young Ho Lee[†], Jang Sik Park[††], Ju Sung Park[†††] and Kyung Sik Son[†††]

ABSTRACT

In this paper, an acoustic echo canceller(AEC) is implemented by ADSP-2181. This AEC uses a noise robust adaptive algorithm and a postprocessing method which attenuates residual echo using cross-correlation between estimated error signal and microphone input signal. We propose new postprocessing method that uses two thresholds to prevent signal distortion after postprocessing and to improve the performance of AEC without extra computational burden. Through experiments using a 16 bit fixed-point DSP board (ADSP-2181 EZ-KIT Lite board), it is shown that the noise robust adaptive algorithm performs well in the double-talk situations and the convergence speed is comparable to NLMS. Using the postprocessor, ERLE is improved about 20 dB. As a result, the AEC with a postprocessor shows better performance than conventional ones.

1. 서 론

통신 시스템의 발달로 다양한 음성 통신 서비스가 제공되고 있으며 편리하고 안전한 통화를 위해서 핸드프리(hands-free) 단말기를 이용한 음성 통신이 원거리회의(teleconference), 차량용 핸드 프리 전화기 등에 활용되고 있다[1,2]. 그러나 핸드 프리 단말기를 이용한 음성통신에서는 상대방의 출력 음성 신호가 스피커로 출력되어 마이크로 입력되는 음향 반향(acoustic echo)이 생겨 음향 반향을 제거하지 않으면 통화가 부자연스럽게 된다[1]. 핸드 프리 단말기를 이용한 음성 통신에서 음향 반향을 제거하여 원활한 음성 통신을 할 수 있도록 하는 것이 음향 반향

[†] 준회원, 부산대학교 전자공학과
[††] 정회원, 동의공업대학 영상정보과
[†††] 부산대학교 전자공학과

제거(acoustic echo cancellation) 기술이다. 공간의 음향 환경 즉, 창문의 개폐나 사람들의 움직임에 따라 반향 경로의 임펄스 응답이 변한다. 따라서 음향 반향 제거기는 시간에 따라 변하는 반향 경로를 추정하여 음향 반향 신호를 추정하는 적응 필터(adaptive filter) 기법이 활용되고 있다[3,4].

구조가 간단하고 안정한 수렴을 하는 NLMS 알고리즘(normalized least mean square algorithm)이 음향 반향 제거 알고리즘으로 널리 사용되고 있으나, 입력 신호가 음성신호와 같이 유색 신호(colored signal)인 경우에는 수렴속도가 현저히 저하된다[2,5,6]. RLS (recursive least square) 알고리즘[7]은 유색 신호에 대해서 수렴속도가 저하되지 않지만 계산량이 많다. 계산량이나 수렴속도 측면에서 AP 알고리즘은 성능이 우수하지만 투영 과정에서 잡음 증폭이 생겨 알고리즘의 성능을 저하시킨다[8]. 음향 반향 제거기에서 잡음은 적응 필터를 오조정시켜 반향제거 성능을 저하시킨다. 특히 동시 통화 시 적응 필터의 계수 오조정이 심각하게 발생한다. 동시통화의 문제를 해결하기 위해서 동시통화 검출기[9]를 이용하는 방법과 적응 필터의 적응 상수를 조절하는 방법 등이 제안되고 있다.

본 논문에서는 음향 반향제거기의 성능을 향상시키기 위해서 주변잡음에 대해서 강건한 특성을 가지는 적응 알고리즘을 사용하고 이 알고리즘과 연동하여 동작되는 후처리기를 음향 반향 제거기의 후단에 삽입한 음향 반향 제거기[1]와 이 후처리기의 단점을 보완한 새로운 음향 반향 제거기를 16 비트 고정 소수점 DSP (ADSP-2181)를 이용하여 구현하였다. 이 적응 알고리즘은 근단화자의 음성 신호 등의 주변 잡음에 의해서 적응 필터의 계수가 오조정되지 않도록 적응 필터 입력 신호의 전력과 마이크 입력 신호 전력의 합으로 적응 상수를 정규화하여, 근단 화자나 주변잡음이 없는 경우에는 NLMS 알고리즘과 같이 적응하고 주변 잡음 신호가 있는 경우에는 그 전력만큼 적응 상수 값을 감소시켜 계수 오조정을 줄여 주변 잡음 신호에 의해서 반향 제거 성능이 저하되는 것을 줄일 수 있다. 이 적응 필터와 연동하여 동작하는 후처리기는 적응 필터에서 반향 경로를 정확하게 추정하지 못하여 생긴 잔여 반향을 적응 필터의 추정 오차 신호와 마이크 입력 신호와의 상관도를 이용하여 잔여 반향을 감쇠시킨다. 근단화자의 음성신호가 없이 음향 반향신호만 있을 때에는 적응필터에 의해서 추정 가능한 반향 성분이 제거되었기 때문에 마이크 입력신호와 추정 오차신호간의 상관도는 낮다. 반대로 근단화자의 음성신호가 있을 때에는 추정 오차 신호에 근단화자의 음성신호가 대부분을 차지함으로 상관도는 1에 가까워진다. 이런 성질을 이용해서 상관도를 음향 반향 제거기의 출력인 추정 오차신호에 곱해서 전송신호를 구함으로써 근단화자 음성신호의 손상을 줄이면서 잔여반향을 제거한다. 그렇지만 이 방법도 근단화자의 신호가 존재할 때에는 후처리기에 의하여 신호의 왜곡이 발생한다. 본 논문에서는 이런 신호의 왜곡을 방지하기 위하여 새로운 후처리 방법을 제안하였다. 이 방법은 기존의 후처리기를 변형하여 잔여 반향 제거 성능은 유지하고, 근단화자 신호가 있는 구간에서 신호의 왜곡을 줄이는 방법으로 이미 계산된 상관도를 이용하여 두 개의 문턱치로 후처리 여부를 구분하여 신호의 왜곡을 줄이면서 잔여 반향 제거 성능을 유지한다. 이러한 구조를 가지는 음향 반향 제거기는 실험을 통하여 동시통화에도 우수하게 동작하고, 수렴 속도도 NLMS 알고리즘에 비해서 느리지 않음을 보였다. 그리고 후처리기를 사용함으로 ERLE가 평균 20 dB 이상 향상되었다.

본 논문은 2장에서는 적응 반향 제거기에 대해서 기술하고, 3장에서는 후처리기를 가지는 음향 반향 제거기에 대해 설명한다. 4장은 DSP를 이용한 음향 반향 제거기의 구성에 대해서 설명하고, 후처리를 이용한 음향 반향 제거기의 실험 결과에 대해서 정리한다. 마지막으로 5장에서 결론으로 본 연구 결과를 정리하고 앞으로의 연구과제에 대해 언급한다.

2. 적응 반향 제거기

2.1 적응 필터를 이용한 음향 반향 제거

적응 필터를 이용한 음향 반향 제거기의 기본적인 구조는 그림 1과 같다. $x(k)$는 원단화자 신호이고, 적응 필터의 입력신호이다. $y(k)$는 스피커에서 출력되어 마이크로 입력되는 반향신호이다. $n(k)$는 근단 화자의 음성신호를 포함한 주변 잡음 신호이며 $d(k)$는 반향과 주변 잡음신호를 포함하는 마이크 입력신호이다. $d(k)$는 적응필터의 주 입력 신호(primary input signal)가 된다. $e(k)$는 적응필터의 추정 오차 신호(estimation error)이며 음향 반향 제거기의 잔여 반
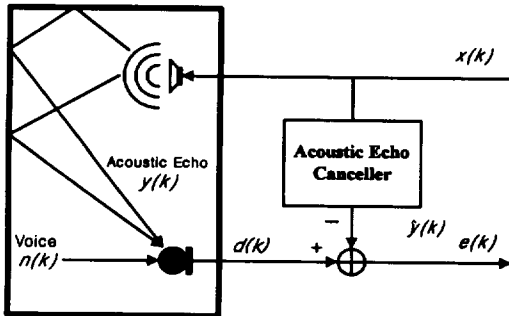
그림 1. 적응필터를 이용한 음향 반향 제거기

향(residual echo)이다. 적응필터는 입력신호 $x(k)$와 추정 오차 신호 $e(k)$를 이용해서 스피커와 마이크 사이의 반향경로를 추정한다. 적응필터가 반향경로를 적절히 추정하면 적응필터의 출력신호 $\hat{y}(k)$는 반향 $y(k)$를 추정한다. 따라서 마이크 입력 $d(k)$로부터 적응필터의 출력신호 $\hat{y}(k)$를 빼줌으로써 반향을 제거한다.

대부분의 음향 반향 제거기는 안정한 수렴이 보장되는 적응 FIR 필터를 이용하여 구현되고 있다. FIR 필터로 모델링하면 임펄스 응답이 상당히 길어지고 계산량이 증가하므로 간단하면서 입력 음성신호에 대해서도 수렴속도가 변하지 않는 알고리즘이 요구된다.

음성통신에서 원단화자의 음성 신호와 근단 화자의 음성신호가 동시에 발생하는 것을 동시통화(double-talk)라고 한다. 동시 통화 시 근단 화자의 음성신호는 주변 잡음 역할을 하여 적응 필터의 계수 오조정을 가져와 반향 제거 성능이 저하된다. 동시통화의 문제를 해결하는 방법은 크게 두 가지 형태가 있다. 동시통화 검출기를 이용하는 방법과 적응필터의 상수를 시변하는 방법이다. 그러나 전자는 반향과 근단 화자의 음성신호 특성이 유사함으로 구분 검출이 어렵고, 또한 동시 통화와 반향 경로의 변화를 구분 검출하여야 하나 이 또한 어렵다. 그리고 후자의 방법은 적응 초기에 수렴속도가 많이 떨어지는 단점이 있다. 언급한 적응필터의 특성에 따라 음향 반향 제거 알고리즘이 갖추어야 할 조건을 정리하면 다음과 같다.

① 반향 경로의 변화에 추정할 수 있도록 수렴이 빨라야 한다.

② 입력 음성신호에 대해서 수렴속도가 저하되지 않아야 한다.

③ 구현이 용이하도록 알고리즘의 계산량이 적어야 한다.

④ 동시통화 및 주변 잡음에 대해서 강건한 특성을 가져야 한다.

2.2 NLMS 알고리즘

적응필터를 이용한 적응 반향 제거기는 일반적으로 안정된 수렴을 하고 구조가 간단하여 구현이 용이한 NLMS 알고리즘을 주로 사용한다. NLMS 알고리즘은 LMS 알고리즘의 적응상수를 식(1)과 같이 입력신호의 전력으로 정규화한 것이다.

$$\mu(k)=\frac{\alpha}{\mathbf{X}^T(k)\mathbf{X}(k)}\approx\frac{\alpha}{L\sigma_x^2} \quad (1)$$

$X(k)$는 적응필터의 입력벡터이다. 식(1)의 $\mu(k)$는 적응상수이고, α는 적응 필터의 정규화 상수이다. L은 적응필터의 차수를 나타내며 σ_x^2는 입력신호의 분산이다.

NLMS 알고리즘은 동시 통화시 근단 화자의 음성신호에 의해서 적응필터의 계수가 크게 오조정되어 음향 반향 제거 성능이 저하되는 단점이 있다. 적응필터의 계수벡터는 상관관계(correlation)가 없는 $n(k)$에 의해서 오조정 된다. 그리고 $n(k)$에 에너지가 큰 근단 화자의 음성신호가 포함되면 오조정은 더욱 커진다. 수렴 속도는 적응 필터의 길이에 의존한다. 입력이 백색 Gaussian 잡음인 경우에는 이 알고리즘은 적응을 정상적으로 행한다. 그러나 입력이 음성신호인 경우에는 수렴 속도가 현저하게 떨어진다.

그러나 실제 적용에서는 연산 능력 및 정확도의 제한 때문에 NLMS알고리즘이 주로 이용된다. 그러나 입력이 음성인 경우에는 음성 신호가 강한 상관도를 가지기 때문에 NLMS 알고리즘의 적응 성능이 현저하게 떨어진다. 이런 문제를 해결하기 위해서는 적응 필터 입력의 전단에 decorrelation 필터를 달거나 입력이 음성 신호인 경우에도 적응 성능이 떨어지지 않게 NLMS 알고리즘을 개조하여야 한다.

2.3 잡음에 강건한 적응 알고리즘 (Noise Robust Algorithm)

본 논문에서는 주변잡음에 의해서 적응필터의 계수 오조정을 줄이기 위해 잡음에 대해서 강건한 음향 반향 제거 알고리즘을 사용한다(이하 이 알고리즘을

Noise Robust 알고리즘이라고 한다.). 이 알고리즘은 적응필터의 계수를 적응시킬 때 식(1)의 NLMS 알고리즘 적응상수대신 식 (2)와 같이 가중값을 곱한 적응상수를 이용하여 잡음에 의한 계수 오조정을 감소시킨다.

$$\mu(k)=\frac{\sigma_x^2(k)}{\sigma_x^2(k)+\sigma_d^2(k)}\frac{\alpha}{X^T(k)X(k)} \quad (2)$$

$\sigma_x^2(k)$와 $\sigma_d^2(k)$는 각각 입력신호와 마이크로폰 입력신호의 분산(variance), 즉 전력이다. 가중 값은 근단 화자나 주변잡음이 적은 경우에는 1에 가까워져서 NLMS 알고리즘과 같이 적응하고 주변 잡음 신호가 있는 경우에는 그 전력만큼 적응 상수 값을 감소시켜 계수 오조정을 줄일 수 있다. 그리고 식(2)는 입력신호벡터의 내적을 입력신호의 전력으로 표현할 수 있기 때문에 식(3)으로 표현 할 수 있다.

$$\mu(k)=\frac{\sigma_x^2(k)}{\sigma_x^2(k)+\sigma_d^2(k)}\frac{\alpha}{L\sigma_x^2(k)} = \frac{\alpha}{L(\sigma_x^2(k)+\sigma_d^2(k))} \quad (3)$$

여기서, $\sigma_x^2(k)$ 및 $\sigma_d^2(k)$는 실제 구현에서 running power estimate로 추정하기 때문에 NLMS 알고리즘과 거의 비슷한 계산량을 가진다.

3. 후처리기를 가지는 음향 반향 제거기

음성 통신 환경에서 주변 잡음과 측정 잡음신호로 인해 적응 음향 반향 제거기의 정확한 반향경로 추정이 어렵기 때문에 상당한 잔여 반향이 남게된다. 잔여반향이 없도록 하기 위해서는 반향 경로의 변화를 빠르게 추정하고 주변잡음에 대해서 적응 필터의 계수 오조정이 없어야 한다. 그러나 입력이 음성 신호일 때도 수렴 특성이 우수한 RLS 등의 적응 알고리즘 역시 주변 잡음 신호에 의해서 계수 오조정이 발생하며, 구현하는데도 많은 계산량을 필요로 한다. 그러므로 본 논문에서는 2.3절에서 언급한 Noise Robust 알고리즘으로 반향을 제거하고 남은 잔향은 후처리를 통하여 제거한다.

3.1 후처리기

기존의 후처리기는 마이크 입력신호로 정규화된
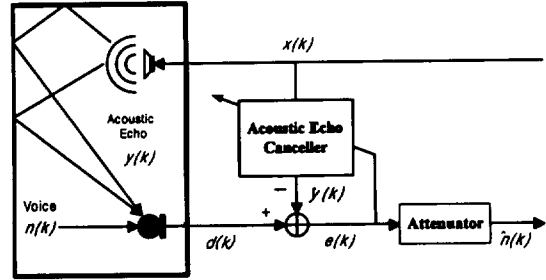
그림 2. 후처리기를 가지는 음향 반향제거기의 구조

추정 오차 신호와 마이크 입력 신호간의 상관도, $E[e(k)d(k)]/E[d^2(k)]$를 이용하여 식(4)와 같이 추정 오차신호를 감쇠시켜 송신신호 $\hat{n}(k)$를 출력한다.

$$\hat{n}(k)=\rho(k)e(k) \quad (4)$$

$\rho(k)$는 아래의 식과 같이 표현된다.

$$\rho(k)=\frac{E[e(k)d(k)]}{E[d^2(k)]} = \frac{E[e(k)y(k)]+E[e(k)n(k)]}{E[d^2(k)]} \quad (5)$$

그리고, 반향신호 $y(k)$와 주변 잡음신호 $n(k)$가 서로 상관이 없기 때문에 식(5)는

$$\rho(k)=\frac{E[e(k)d(k)]}{E[d^2(k)]} = \frac{E[e(k)y(k)]+E[e(k)n(k)]}{E[y^2(k)]+E[n^2(k)]} \quad (6)$$

이 된다. 정규화 상관도 $\rho(k)$는 반향신호, 주변 잡음신호 그리고 수렴 정도에 따라 값이 변한다.

적응필터가 수렴하지 않은 경우의 $\rho(k)$는 식(7)과 같다.

$$\rho(k)=\frac{E[(y(k)-\hat{y}(k)+n(k))y(k)]+E[(y(k)-\hat{y}(k)+n(k))n(k)]}{E[y^2(k)]+E[n^2(k)]} \quad (7)$$

주변 잡음신호가 음향 반향 신호와 반향 추정신호와 상관도가 없다는 가정을 적용하면 식(7)은

$$\rho(k)=\frac{E[y^2(k)-\hat{y}(k)y(k)]+E[n^2(k)]}{E[y^2(k)]+E[n^2(k)]} \quad (8)$$

과 같이 간단하게 표시된다. 수렴 초기에는 반향신호와 적응필터의 출력신호의 상관도가 낮다. 따라서 근단 화자의 음성 신호를 포함한 주변 잡음 신호의 유

무에 상관없이 $\rho(k)$는 1에 가까운 값이 된다. 그리고 적응필터가 음향 반향 경로를 추정해감에 따라 $\hat{y}(k)$는 $y(k)$에 가까워져서 $\rho(k)$는 주변잡음 신호의 전력에 의존하게 된다.

적응필터가 음향 반향 경로를 거의 추정할 정도로 수렴한 경우, 적응필터의 출력 $\hat{y}(k)$는 음향 반향 $y(k)$를 추정한다. 따라서 식(8)은

$$\rho(k) = \frac{E[n^2(k)]}{E[y^2(k)] + E[n^2(k)]} \tag{9}$$

이 된다. 식(9)의 우변을 보면 $n(k)$가 입력신호이고 $y(k)$가 잡음인 경우에 대한 Wiener 필터와 같다. 따라서 반향 신호가 근단 화자의 음성신호보다 크면 $\rho(k)$ 값은 작아지고 근단화자의 음성신호가 반향신호보다 크면 $\rho(k)$는 거의 1이 된다.

동시 통화가 발생했을 때에는 식(9)와 같은 비율로 근단 화자의 음성신호와 음향 반향신호의 비율에 따라 감쇠된다. 그런데 NLMS 알고리즘과 같이 주변잡음에 의해서 계수 오조정이 심한 알고리즘은 적응필터의 출력이 반향 신호를 제대로 추정하지 못하기 때문에 잔여 반향이 많이 생길 뿐만 아니라 전송되어야할 근단 화자의 음성신호가 왜곡된다. 이 경우 후처리를 하게되면 근단 화자의 음성신호가 마이크 입력신호와 상관도가 낮은 상태이기 때문에 감쇠된다. 따라서 후처리기가 효과적으로 동작하기 위해서는 잡음에 강건한 알고리즘과 연동하는 것이 바람직하다.

3.2 제안하는 후처리기

제안하는 후처리기는 기존의 후처리기[1]가 항상 추정 오차 신호와 마이크 입력 신호간의 상관도, $\rho(k)$ 값을 추정 오차 신호에 곱하여 출력함으로써 동시통화 상황이나 근단화자 신호만이 존재하는 구간에서 출력신호의 왜곡이 생기는 점을 보상하기 위하여 기존에 계산된 $\rho(k)$를 두 개의 문턱치를 비교함으로써 후처리 유무를 판단하여 처리하는 과정이다. 이 후처리기는 기존의 후처리기에 비교 연산을 추가함으로써 많은 연산량의 증가없이 훨씬 자연스러운 음을 출력할 수 있게 된다. 제안하는 후처리 알고리즘은 표 1과 같다.

제안하는 후처리 알고리즘의 흐름도는 그림 2와 같다. 상한 문턱치(Th2)와 하한 문턱치(Th1)의 선정은 running power estimation에 사용되는 망각지수 (forgetting factor) β값과 밀접한 관계를 갖는다. β값이 1에 가까우면 가까울수록 상한 문턱치도 커져야 되고 β값이 1에서 멀어지면 상한 문턱치 값도 낮추어야 하고 하한 문턱치의 값의 변경도 있어야 한다. β값에 맞게 적절한 상·하한 문턱치를 정하여 기존에 계산된 $\rho(k)$를 각 문턱치와 비교하면서 근단화자 신호나 동시통화 상황일 경우에는 적응 필터로 처리된 신호를 감쇠없이 보내주고, 그 외의 경우에는

표 1. 제안하는 후처리 알고리즘

제안하는 후처리 알고리즘
◆ 감쇠량 계산
$\rho(k) = \frac{Pow_{ed}(k)}{Pow_d(k)}$
when, $Pow_{ed}(k) = \beta Pow_{ed}(k-1) + (1-\beta)e(k)d(k)$
$Pow_d(k) = \beta Pow_d(k-1) + (1-\beta)\, d^2(k)$
◆ 문턱치를 이용한 감쇠여부 판별
$\rho(k) \le Th1$ $\quad \hat{n}(k) = \rho(k) \times e(k)$, put $status = 0$
$\rho(k) \ge Th2$ $\quad \hat{n}(k) = e(k)$, put $status = 1$
$Th1 < \rho(k) < Th2$ $\quad \hat{n}(k) = e(k)$
when $status \equiv 2$ or $status \equiv 0$, put $status = 2$
$Th1 < \rho(k) < Th2$ $\quad \hat{n}(k) = \rho(k) \times e(k)$
when $status \equiv 3$ or $status \equiv 1$, put $status = 3$

그림 3. 제안하는 후처리 흐름도

$\rho(k)$를 적응 필터로 처리된 신호에 곱하여 잔여 반향 신호를 감쇠시켜 보내준다.

본 논문에서는 앞에서 언급한 잡음에 강건한(Noise Robust) 알고리즘과 후처리기를 연동하여 잔여 반향이 없는 음향 반향 제거 시스템을 구현하였다. 이 후처리기를 가지는 음향 반향 제거기는 잔여 반향을 대부분 제거하며 근단 화자의 음성신호는 왜곡없이 전송할 수 있으며, 기존의 NLMS 알고리즘을 사용하고 동시통화 검출기를 이용한 방법에 비해서 계산량이 크게 증가하지 않으면서, 우수한 성능향상을 보였다. 표 2는 NLMS 알고리즘만을 이용한 음향 반향 제거기와 제안하는 방법과의 계산량을 비교하였다. 고정 소수점 DSP를 이용해서 나눗셈을 하는 경우에는 별도의 추가 계산이 필요하기 때문에 여기서는 따로 구분하여 비교한다. 제안하는 알고리즘은 NLMS 알고리즘보다 나눗셈이 1회 증가하고 곱셈과 덧셈이 각각 7회, 5회가 증가한다.

표 2. 계산량 비교

Algorithm	Multiplication	Addition	Division
NLMS	2L+ 4	L+4	1
Proposed	2L+11	L+9	2

4. DSP를 이용한 음향 반향 제거 구현 및 실험

4.1 음향 반향 제거 실험 구성

실시간 음향 반향 제거 실험을 위해서 ADSP-2181 EZ-KIT LITE 보드를 이용하여 그림 4와 같이 구성하고, DSP 보드에 음향 반향 제거 알고리듬을 실장하여 반향을 제거한다. 개인용 컴퓨터에 장착되어 있는 전이중방식(full duplex)의 사운드 카드로 DSP 보드의 라인 입력과 출력을 연결하여 구성한다. 같은 조건에서 각 알고리듬에 대한 성능 평가를 하기 위해서 원단화자의 음성신호를 미리 녹음하여 사운드 카드의 라인 출력을 통해서 스테레오로 출력한다. 원단화자의 음성 신호는 사운드 카드의 라인 출력을 통해서 DSP 보드의 라인 입력되도록 한다. DSP 보드에서는 라인 입력된 원단화자의 음성 신호를 스피커로 출력한다. 근단 화자의 음성신호와 반향은 마이크 입력을 통해 입력되고 이 신호는 실장된 음향 반향 제거 알고리즘으로 반향이 제거되어 라인 출력을
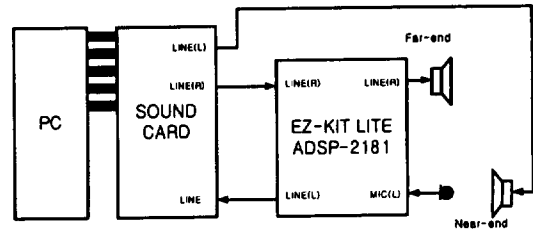
그림 4. 음향 반향제거 실험 구성도

통해서 사운드 카드의 라인 입력으로 들어간다. 사운드 카드로 입력된 신호는 개인용 컴퓨터로 동시 녹음하여 잔여 반향을 계산하여 성능을 평가한다[10,11].

적응 필터의 탭수를 256 탭으로 하고, 8 kHz로 샘플링한 신호를 사용하여 반향 제거기를 동작시킬 때 다음과 같은 연산 속도가 필요하였다. NLMS 알고리즘을 이용하면 24.8 MIPS, Noise Robust 알고리즘으로는 25.4 MIPS 그리고 Noise Robust 알고리즘으로 적응하고 후처리를 할 때는 약 29.2~29.5 MIPS가 소요되었다. ADSP-2181은 32 MIPS까지 동작이 가능하므로 충분히 실시간이 구현이 가능하다[12,13].

4.2 실험 결과 및 검토

음향 반향 제거 실험에서 각 전력은 계산량을 고려하여 running power estimation으로 추정하고 β는 망각지수(forgetting factor)로 0.998로 두고, 정규화 적응상수 α는 0.2로 두었다. 적응 필터의 탭수는 256차로 하여 실험을 하였다. 그림 5는 반향 제거 실험에 사용한 음성신호들을 그린 것이다. 그림 5의 (a)
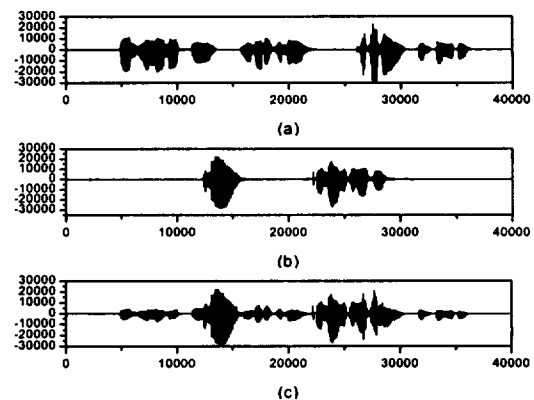
그림 5. 입력 신호
(a) 원단화자 신호, (b) 근단화자 신호, (c) 마이크입력신호

는 원단화자의 음성신호로써 "NLMS 알고리즘은 구조가 간단하다."라는 남성 화자 신호이고 그림 (b)는 "음향 반향 제거기"라는 또 다른 남성 화자 신호이다. 그리고 (c)는 마이크로 입력되는 신호이다. 각 신호들은 8 kHz로 샘플링하고 16 비트로 양자화한다. 여기서 잡음은 마이크로 입력되는 주변 잡음을 말하며 실제 실험에서는 실험 환경의 주변 잡음이 마이크로 입력되어 사용되어 졌다.

성능평가는 잔여 반향 신호와 음향 반향 제거 성능 평가에 일반적으로 사용되는 ERLE(echo return loss enhancement)를 비교한다. ERLE는 식(10)와 같이 계산한다.

$$ERLE(k) = 10\log_{10}\frac{\sum_{i=0}^{L-1} d^2(n-i)}{\sum_{i=0}^{L-1}(d(n-i)-\hat{y}(n-i))^2} \tag{10}$$

(1) 후처리기가 없는 경우의 음향 반향 제거 실험 결과

그림 6을 보면 동시통화가 발생하기 전 까지는 비슷한 반향 제거 성능을 보이다 동시통화가 발생하면서 두 알고리즘의 성능 차를 확연히 알 수 있다. 그림 6의 (b)에서 보이는 바와 같이 NLMS 알고리즘으로 반향제거를 한 결과는 근단 화자의 신호가 많이 손상되어 있는 것이 보인다. 그리고 (b)와 (c) 모두 잔여 반향이 충분히 제거되지 않았다. 잔여 반향 제거를 위한 후처리기가 필요함을 알 수 있다.
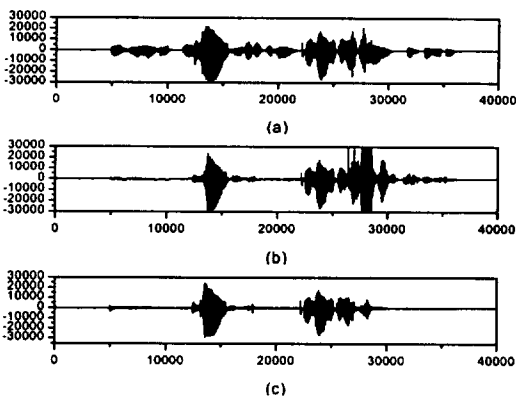
그림 6. 후처리기가 없는 경우의 반향제거 실험 결과
(a) 마이크 입력 신호, (b) NLMS 결과
(c) Robust 알고리즘 결과

(2) 후처리기를 이용한 음향반향 제거 실험 결과

그림 7을 보면 후처리기를 통과한 후 두 알고리즘이 모두 잔여 반향이 현저히 줄어든 것을 볼 수 있다. 그러나 동시통화가 발생된 27,000 샘플 이후의 NLMS 알고리즘을 사용한 반향 제거 결과는 후처리기 이전 데이터의 왜곡이 생겨 후처리 후에도 많은 왜곡이 남는다. 그리고 그림 7의 (b)와 (c)를 비교하면 NLMS 알고리즘을 사용한 결과인 (b)의 신호크기가 많이 감쇠되어 있는 것을 알 수 있다. NLMS 알고리즘으로 반향을 제거하는 경우 동시 통화시 적응 필터가 오조정되어 마이크 입력 신호의 근단화자 음성 신호 성분이 많이 감쇠되었다. 이 결과에서 후처리기는 잡음에 강건한 알고리즘과 연동하여 동작시켜야함을 알 수 있다. 그러나 이 후처리기는 출력신호를 감쇠시킴으로써 실제 전달되어야 하는 신호 또한 왜곡이 되는 현상이 생긴다.
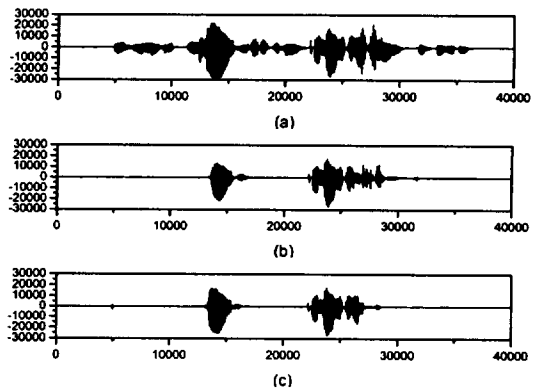
그림 7. 후처리기를 이용한 반향제거 실험 결과(1)
(a) 마이크 입력 신호
(b) NLMS+후처리 결과
(c) Robust 알고리즘+후처리결과

(3) 후처리기 전후의 음향반향 제거 시뮬레이션 결과 비교

감쇠기를 이용한 후처리기의 단점을 보완하기 위하여 제안된 새로운 후처리기와 기존 후처리기를 비교하였다. 그림 8의 (a)는 실제로 전달되어야 할 근단화자 신호이고, (b)는 기존의 후처리 결과, (c)는 제안하는 후처리기 결과이다. (b)와 (c)를 비교해보면 제안하는 후처리기의 결과가 기존의 후처리기 결과에 비하여 근단화자 신호와 더 유사하며, 신호의 왜곡이 많이 생긴 것을 볼 수 있다. 그리고 그림 (c)의 5000에

서 7000 샘플 사이의 잔여 반향은 적응 필터가 수렴하기 전에 후처리 여부를 판별하면서 생긴 오차이나 수렴이후에는 발생하지 않으므로 무시할 수 있다.
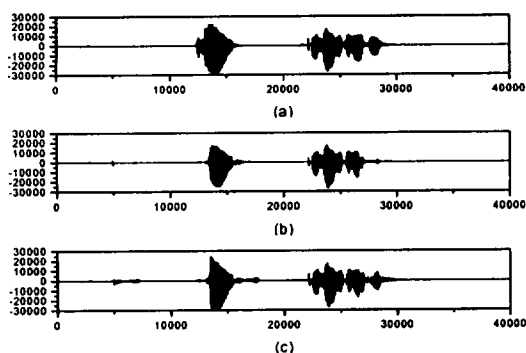
그림 8. 후처리기를 이용한 반향제거 실험 결과(2)
(a) 근단 화자 신호
(b) 기존의 후처리 결과
(c) 제안하는 후처리결과

그림 9를 보면 후처리 전후의 잔여반향 제거 효과를 한눈에 알수 있다. 후처리 전과 후의 ERLE를 비교하면 평균 20 dB 이상 개선되었다. 따라서 제안하는 후처리기에 의해서 원단화자의 음성신호만 있는 경우의 잔여 반향 제거 성능이 우수함을 확인 할 수 있다. 그리고 기존의 후처리기와 제안하는 후처리기의 ERLE는 대체적으로 비슷한 정도를 보이나 특히 27000 샘플에서 30000 샘플 사이의 동시 통화가 발생된 시점에서의 ERLE를 비교해 보면 제안하는 후처리기의 결과가 기존의 후처리기에 비하여 출력 신호의 왜곡이 작다는 것을 알 수 있다. 동시 통화시에는 근단 화자의 신호가 추정 오차에 대부분 나타남으로
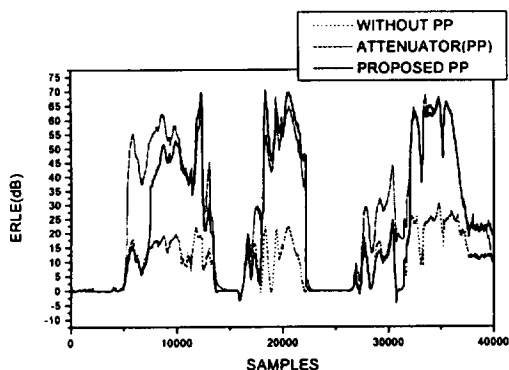
그림 9. ERLE 비교

ERLE는 0에 가까운 것이 근단화자의 음성 신호에 왜곡이 적은 것으로 볼 수 있다. 결론적으로 ERLE 그래프를 비교하여보면 제안된 후처리기가 기존의 후처리기에 비하여 출력 신호의 왜곡을 줄이면서 우수한 잔여 반향 제거 효과를 보인다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 적응 필터를 이용하여 음향 반향을 제거하고 후처리를 통해서 잔여 반향을 감쇠시킴으로써 통화의 품질을 향상시키는 방법을 16 비트 고정 소수점 DSP인 ADSP-2181을 이용하여 구현하였고, 기존의 후처리기에 비해서 출력 신호의 왜곡이 적은 새로운 후처리기를 제안하였다. 이 구조는 기존의 적응 필터를 이용한 음향 반향 제거기에 비해 많은 연산량을 소비하지 않고도 우수한 성능을 보였다.

16 비트 고정 소수점 DSP를 이용한 하드웨어 실험 결과를 통하여 잡음에 강건한 적응 알고리즘이 동시 통화 상황에서도 우수하게 동작하고, 수렴 속도도 NLMS 알고리즘에 비해서 떨어지지 않음을 보였다. 후처리기를 사용하면 ERLE가 평균 20 dB 이상 향상되었고 제안하는 후처리기를 사용하는 반향 제거기의 출력이 기존 후처리기를 통과한 출력보다 신호의 왜곡이 줄어 기존의 음향 반향 제거기에 비해서 성능이 향상됨을 보였다. 향후 연구과제로는 제안하는 후처리기의 특성을 이용하여 이를 동시 통화 검출기에 응용하는 연구를 하고 스테레오 음향 반향 제거기에 적용하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] 박장식, "후처리를 이용한 음향 반향 제거기의 성능향상", 부산대학교 박사학위논문,1999. 2.

[2] S. Makino, "The Past, Present, and Future of Audio Signal Processing-Acoustic Echo Cancellation", IEEE Signal Processing Magazine, pp. 39-41, Sep., 1997,

[3] C. Antweiler, J. Grunwald and H. Quark, "Approximation of Optimal Step Size Control for Acoustic Echo Cancellation", Proc. of ICASSP97, pp.295-298, 1997

[4] P. Heitkamper, "An Adaptation Control for Acoustic Echo Cancellers", IEEE Signal Processing Letters. Vol. 4, No. 6, pp. 170-172, June, 1997
[5] B. Widrow and S. D. Stern, Adaptive Signal Processing, Prentice-Hall, p. 26, 1985.
[6] K. Ozeki and T. Umeda, "An Adaptive Filtering Algorithm Using an Orthogonal projection to an affine subspace and its property," Electron. Comm. Japan, VOL. J67-A, NO. 2, pp. 126-132, 1984.(Japanese)
[7] S. Haykin, Adaptive Filter Theory, Prentice Hall, N.J., 1995
[8] K. Maouche and D. T.M. Slock, "A Fast Instrumental Variable Affine Projection Algorithm," ICASSP 98, pp. 2386-2389, 1998.
[9] H. Ye and B. X. Wu, "A New Double-Talk Detection Algorithm Based on the Orthogonality Theorem," IEEE Trans. Communications, VOL. 39, NO 11, pp. 1542-1545, Nov., 1991.
[10] "ADSP 2100 Family User's Manual-3rd Ed.", Analog Device, 95.9.
[11] "ADSP-2100 Family EZ-KIT Lite Reference Manual", Analog Device.
[12] 이영호, 박장식, 손경식, "고정소수점 DSP를 이용한 음향 반향 제거기의 구현", 제12회 신호처리 합동학술대회 논문집, pp. 905-908, 1999년 10월
[13] Sakaguchi J, et al, "Acoustic echo canceller system materialized with a 16-bit fixed point processing type DSP," IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics Communications & Computer Sciences, VOL. E82-A N.12, 2828-2821, 1999.

이 영 호

1968년 7월 22일생
1993년 2월 부산대학교 전자공학과 (공학사)
2000년 2월 부산대학교 전자공학과 (공학석사)
2000년 3월~현재 부산대학교 전자공학과 대학원 박사과정
관심분야 : 적응신호처리, 음성신호처리, 입체음향

박 장 식

부산대학교 전자공학과에서 공학석사와 공학박사 학위를 취득하였으며 1997년부터 동의공업전문대학 영상정보처리과에 조교수로 재직 중이다. 주요 관심분야는 음성 및 음향 신호처리 및 멀티미디어 통신 그리고 입체음향 분야이다.

박 주 성

1953년 12월 19일생
1976년 2월 부산대학교 전자공학과 (공학사)
1978년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1979년 3월~1985년 7월 한국전자기술연구소
1989년 8월~1991년 3월 한국전자통신연구소 책임연구원
1991년 3월~현재 부산대학교 전자공학과 부교수
관심분야 : DSP 설계 및 응용, 사운드 합성, 반도체 소자 모델링

손 경 식

부산대학교 전자공학과에서 공학석사 학위를 취득하고 경북대학교에서 공학박사 학위를 취득했다. 1979년부터 현재까지 부산대학교 전자공학과 교수로 재직중이다. 주요 관심분야는 디지털 신호처리 및 적응 신호 처리이며 음성 및 음향 응용 시스템에 대한 연구를 하고 있다.